

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky



Bakalářská práce

Návrh centrické clony pro měření průtoku vzduchu  
na výtlačku kompresoru

Design of the Centric Orifice Plate for Measurement  
of Flow Rate at the Compressor Discharge

Student:

Robert Růžička

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Šmída, Ph.D.

Ostrava 2020

## Zadání bakalářské práce

Student: **Robert Růžička**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3904R016 Technika tvorby a ochrany životního prostředí  
Téma: **Návrh centrické clony pro měření průtoku vzduchu na výtlaku kompresoru**  
**Design of the Centric Orifice Plate for Measurement of Flow Rate at the Compressor Discharge**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

V teoretické části práce zpracujte rešerši na téma „Měření průtoku“. Důraz kladte především na nepřímou metodu stanovení průtoku pomocí měření tlakové difference. Věnujte se jednotlivým průtokoměrům a popište jejich výhody a nevýhody při použití v praxi.

V praktické části práce navrhnete centrickou clonu pro měření průtoku vzduchu na výtlaku kompresoru. Zvolte si konkrétní kompresor a pro zadání příkladu vycházejte z jeho technického listu. Návrh vlastní clony proveďte na základě platné normy ČSN EN ISO 5167:2003. Každý bod výpočtu odůvodněte a případná zjednodušení výpočtu okomentujte.

Návrh bude obsahovat: Volbu kompresoru; na základě technického listu kompresoru volbu vhodné dimenze a jmenovitého tlaku měřidla dle ČSN EN 1092-1; vlastní výpočet clony dle uvedené normy; sestavný výkres clony případně i výkresy výrobní.

### Seznam doporučené odborné literatury:

KAMINSKÝ, Jaroslav, Kamil, KOLARČÍK, Oto, PUMPRLA. Kompresory. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004, 122 s. ISBN 80-248-0704-1.

MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics – First Edition.. New York: John Wiley & Sons, 1990, 840 p. ISBN 0-471-57117-2.

ČSN EN 1092-1: Příruby a přírubové spoje - Kruhové příruby pro trubky, armatury, tvarovky a příslušenství s označením PN - Část 1: Příruby z oceli. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (unmz) Praha, 2014.

ČSN EN ISO 5167-1:2003 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu - Část 1: Obecné principy a požadavky. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (unmz) Praha, 2003.

ČSN EN ISO 5167-2:2003 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu - Část 2: Clony. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (unmz) Praha, 2003.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Šmída**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



---

doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.  
*vedoucí katedry*



---

prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
*děkan fakulty*



## Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 10. 5. 2020



.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же оdevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 10. 5. 2020



.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Robert Růžička

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Ostrava Radvanice, Těšínská 87/281, 716 00

## **Anotace bakalářské práce**

Růžička Robert. *Návrh centrické clony pro měření průtoku vzduchu na výtlaku kompresoru*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 201 6, 49 s. Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Šmída, Ph.D.

Klíčová slova: centrická clona; průtok; měření průtoku.

Bakalářská práce se věnuje návrhu centrické clony pro měření průtoku vzduchu na výtlaku šroubového kompresoru. Na začátku je popsán typ kompresoru, pro který je centrická clona navržena a prvky měřicí soustavy, které jsou nedílnou součástí celé měřicí soustavy, ale nejsou součástí návrhu a výkresové dokumentace. Jsou popsány vlastnosti kompresoru a jeho použití v běžných provozech. Následující popis charakterizuje měřicí zařízení – centrickou clonu – popisuje její výhody a nevýhody. Součástí této práce, jsou výpočty potřebné pro určení správného průměru centrické clony, dle potřebných podkladů. A na závěr narysována v příložených výkresech.

## **Annotation of bachelor thesis**

Růžička Robert. *Design of a Centric Orifice Plate for Measurement of Flow Rate at the Compressor Discharge*. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 201 6, 49 pp. Supervisor: Ing. Zdeněk Šmída, Ph.D..

Keywords: centric orifice plate; flow; flow measurement.

The bachelor thesis deals with the design of a centric orifice plate for measuring the air flow at the discharge of the piston compressor pipe. At the beginning, the type of compressor for which the centric orifice plate is designed and the measuring system elements, which are an integral part of the entire measuring system but are not part of the design and drawing documentation, are described. Descriptions of the compressor properties and their use in conventional operations. The following description characterizes the measuring device - the center aperture - describes its advantages and disadvantages. Part of this work is the calculations needed to determine the correct diameter of the center aperture, according to the required data. And finally, a description of the whole assembly in the attached drawings.

**Obsah**

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK .....	12
Značení veličin a jednotky .....	12
Zkratky .....	13
0.    Úvod .....	14
1.    Mattech .....	15
1.1 Historie .....	15
1.2 Výzkum a vývoj .....	15
2.    Teoretická část .....	16
2.1 Historie měření průtoku .....	16
2.2 Měření průtoku obecně .....	17
2.3 Vztahy a definice měření průtoku .....	17
2.3.1 Rychlost pohybující se částice .....	17
2.3.2 Objemový průtok tekutiny .....	17
2.3.3 Hmotnostní průtok .....	17
2.3.4 Reynoldsovo číslo ( $R_e$ ) .....	18
2.3.5 Bernoulliho rovnice .....	18
2.4 Rozdělení měřicích orgánů .....	18
2.4.1 Měření průtoku škrticími orgány-metody .....	19
2.4.2 Podstata měření průtoku škrticími orgány .....	20
2.4.3 Průtokoměry se škrticími orgány měření pomocí clony-charakteristika .....	20
2.4.4 Důvody měření průtoku .....	21
3.    Praktická část .....	22
3.1 Úvod do metody měření centrickou clonou. ....	22
3.2 Výhody a nevýhody clon .....	22
3.3 Technické parametry kompresoru .....	22
3.4 Terminologie a pojmy .....	23
3.4.1 Měření tlaku .....	23
3.4.2 Teplota .....	24
3.4.3 Primární prvek .....	24
3.4.4 Clona – clonový kotouč .....	24
3.5 Metoda měření a výpočty (princip) .....	24
3.5.1 Metoda měření .....	24
3.6 Určení hustoty a statického tlaku .....	25

## Obsah

3.6.1	Obecné podmínky .....	25
3.6.2	Statický tlak .....	25
3.6.3	Hustota tekutiny .....	25
3.7	Volba potrubí a příruby .....	25
3.8	Volba a konstrukce centrické clony .....	26
3.8.1	Všeobecný popis .....	26
3.8.2	Výhody a nevýhody centrické clony .....	26
3.8.3	Přední strana clony- $A$ .....	27
3.8.4	Zadní strana clony- $B$ .....	28
3.8.5	Tloušťka clony $e$ .....	29
3.8.6	Tloušťka clony $E$ .....	29
3.8.7	Hrana clony $G$ .....	29
3.8.8	Úhel zkosení $\alpha$ .....	29
3.8.9	Odběr tlaku v cloně .....	30
3.8.10	Šířka prstencové štěrbiný $a$ .....	30
3.8.11	Poměr průměrů $\beta$ .....	30
3.8.12	Prstencová štěrbina-plocha .....	32
3.8.13	Prstencová štěrbina-rozměr $b$ .....	32
3.8.14	Prstencová štěrbina-rozměr $c, c'$ .....	32
3.8.15	Prstencová štěrbina-rozměr $f$ .....	33
3.8.16	Prstencová štěrbina-rozměr $j$ .....	33
3.9	Součinitelé centrické clony .....	33
3.9.1	Součinitel průtoku $C$ .....	33
3.9.2	Expanzní součinitel $\varepsilon$ .....	34
3.10	Drsnost vnitřního potrubí .....	34
3.11	Výpočet clony první iterace .....	35
3.11.1	Krok 1 - výpočet Reynoldsova čísla .....	35
3.11.2	Krok 2 – výpočet hustoty vzduchu .....	35
3.11.3	Krok 3 – výpočet součinitele průtoku .....	36
3.11.4	Krok 4 – výpočet průměru clony .....	36
3.11.5	Krok 5 výpočet nového poměru průměrů .....	36
3.12	Výpočet clony druhá iterace .....	37
3.12.1	Krok 1 - výpočet Reynoldsova čísla .....	37
3.12.2	Krok 2 – výpočet hustoty vzduchu .....	38
3.12.3	Krok 3 – výpočet součinitele průtoku .....	38



## Obsah

3.12.4	Krok 4 – výpočet průměru clony .....	39
3.12.5	Krok 5 - výpočet nového poměru průměrů .....	39
3.13	Výpočet clony třetí iterace.....	40
3.13.1	Krok 1 - výpočet Reynoldsova čísla.....	40
3.13.2	Krok 2 – výpočet hustoty vzduchu .....	40
3.13.3	Krok 3 – výpočet součinitele průtoku .....	40
3.13.4	Krok 4 – výpočet průměru clony .....	41
3.13.5	Krok 5 - výpočet nového poměru průměrů .....	41
3.14	Soupis konstrukčních hodnot centrické clony .....	42
3.15	Požadavky na zabudování .....	43
4.	Závěr .....	45
5.	Seznam použité literatury.....	47
6.	Seznam příloh.....	49

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1: Logo Mattech [3].....	15
Obrázek 2-1 Akvadukt Řím [15].....	16
Obrázek 2-2 Rozdělení senzorů [16].....	18
Obrázek 2-3 Centrická clona [3], viz č.1 .....	19
Obrázek 2-4 Dýza [3], viz č.2 .....	19
Obrázek 2-5 Venturiho trubice [3], viz č.3 .....	19
Obrázek 2-6 Pitotova trubice [13], viz č.4 .....	19
Obrázek 2-7 Prandtlova sonda [14], viz č.5 .....	19
Obrázek 2-8 Centrická clona-schéma [4].....	20
Obrázek 3-1 Průhyb centrické clony [11] .....	27
Obrázek 3-2 Centrická clona [11] .....	28
Obrázek 3-3 Clona s koutovým odběrem s prstencovou štěrbinou [11.] .....	31
Obrázek 3-4 Dimenzování přírubových spojů [3].....	44

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 2-1 Příklady škrticích orgánů[v.t.] .....	19
Tabulka 3-1 Technický list kompresoru dle výrobce [příloha E] .....	23
Tabulka 3-2 Maximální mezní hodnota drsnosti [11].....	34
Tabulka 3-3 Minimální mezní hodnota drsnosti [11].....	34
Tabulka 3-4 Výpočtová tabulka první iterace[v.t.] .....	37
Tabulka 3-5 Výpočtová tabulka druhé iterace[v.t.].....	39
Tabulka 3-6 Výpočtová tabulka třetí iterace[v.t.] .....	41
Tabulka 3-7 Tabulka hodnot centrické clony [v.t.].....	42
Tabulka 3-8 Sumarizační tabulka [v.t.].....	43

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

## Značení veličin a jednotky

Značka	Název veličiny	Jednotka
$C$	Součinitel průtoku	—
$d$	Vnitřní průměr škrticího orgánu	$m$
$D$	Průměr	$m$
$l$	Délka	$m$
$m$	Hmotnost tekutiny	$kg$
$p$	Tlak	$Pa$
$\Delta p$	Tlakový rozdíl	$Pa$
$q$	Průtok	$m^3 \cdot s^{-1}$
$q_m$	Hmotnostní průtok	$kg \cdot s^{-1}$
$q_v$	Objemový průtok	$m^3 \cdot s^{-1}$
$r$	Molární plynová konstanta	—
$R_a$	Drsnost povrchu	$mm$
$R_e$	Reynoldsovo číslo	—
$S$	Plocha	$m^2$
$T$	Teplota	$K$
$t$	Čas	$s$
$v$	Rychlost	$m \cdot s^{-1}$
$V$	Objem	$m^3$
$\alpha$	Průtokový součinitel škrticího orgánu	—
$\beta$	Poměr průměrů	—
$\varepsilon$	Expanzní součinitel	—
$\eta$	Dynamická viskozita tekutiny	$Pa \cdot s$
$\kappa$	Izoentropický exponent	—
$\nu$	Kinetická viskozita	$m^2 \cdot s^{-1}$
$\pi$	Ludolphovo číslo	—
$\rho$	Hustota	$kg \cdot m^3$

## Zkratky

Zkratka	Význam
CAD	Computer-aided design (podpora počítačového projektování)
ČSN	Česká státní norma
DN	(Diametr nominal) Jmenovitý průměr
EN	(European norm) Courant - Fridrichs Levi) Courantovo číslo
ISO	(International Organization for Standardization) Světová federace národních normalizačních organizací
PN	(Pressure nominal) Jmenovitý tlak
SI	(Système International d'Unités) Mezinárodní systém jednotek
TCM	Označení typu měřidel schválených Českým metrologickým institutem

## 0. Úvod

V bakalářská práce se dle zadání bude zabývat návrhem centrické clony pro měření průtoku vzduchu na výtlaku kompresoru. Na začátku bude popis měření z hlediska historie způsoby a důvody měření průtoku tekutin. Budou uvedeny příklady měření průtoku obecně, se zaměřením na nejpoužívanější způsoby měření průtoku. Dále se bude týkat jen měření průtoku škrticími orgány. V praktická část bude obsahovat typ kompresoru. Popis výhod a nevýhod měřicího zařízení – centrické clony a její charakteristiku. Vyberu typ centrické clony dle normy ČSN EN ISO 5167-1 [10] a provedu konstrukci podle normy ČSN EN ISO 5167-2 [11]. Budou popsány další prvky měřicí soustavy, které jsou nedílnou součástí celé měřicí soustavy, ale nejsou součástí návrhu a výkresové dokumentace. Popíši vlastnosti kompresoru podle údajů udávaných výrobcem. Součástí této práce je popis, postup a výpočty, potřebné pro určení vnitřního průměru centrické clony a její konstrukci, dle potřebných podkladů vycházejících z parametrů dodaných výrobcem kompresoru a potřebami fiktivního výrobního procesu tak, abychom měli nejnížší ztrátu tlaku. Na závěr bude clona popsána a konstrukce centrické clony zobrazena v přiložených výkresech.

# 1. Mattech

## 1.1 Historie

Bakalářská práce a informace o měřicích zařízeních jsou z velké části z materiálů společnosti Mattech, proto je na úvod potřeba napsat několik vět o historii této společnosti [3].

Společnost MATTECH, s.r.o., byla založena v roce 1992 současným majitelem bez jakékoliv předchozí návaznosti. Úspěšně rozšiřuje výrobní program, jehož těžiště stále spočívá v návrhu, výpočtu, výrobě a servisu měřidel průtoky škrticími orgány dle mezinárodní normy ISO 5167-1 až 5. V průběhu dvou desetiletí byl doplněn o výrobu oddělovacích, odkalovacích a kondenzačních nádob, usměrňovače proudění, restriční clony, několikanásobné restriční clony, speciální clony a clonové kotouče, návarky, šroubení, komory pro měření hladiny, chladiče páry a další komponenty pro strojní části měřicích okruhů [3].



*od roku 1992*

*Obrázek I-1: Logo Mattech [3]*

## 1.2 Výzkum a vývoj

Důležitou součástí společnosti MATTECH, s.r.o., je vlastní vývoj, který je zaměřen na nové produkty a na nové inovativní výrobní. Návrh a konstrukce probíhají ve zcela nových, 3-D konstrukčních programech CAD od společnosti Autodesk. Zkušení pracovníci i junior technici v návrhu a konstrukci připravují podklady pro vlastní výrobu a podílejí se na udržení vysoké kvality výrobků. Výpočty a návrhy měřicích okruhů slouží jako technická podpora projekčním, dodavatelským a montážním organizacím [3].

## 2. Teoretická část

### 2.1 Historie měření průtoku

Měření, nejen průtoku, provázelo člověka odjakživa. Měření bylo důležité v mnoha odvětvích lidské činnosti, např.: stavebnictví, zemědělství, při výrobě nástrojů, při přerozdělování surovin a v mnoha dalších oborech lidské činnosti. Samotné měření probíhalo ve všech společenských strukturách lidské činnosti. První zmínky máme až z období, kdy člověk začal své pozorování a měření zaznamenávat. Jedny z nejstarších



*Obrázek 2-1 Akvadukt Řím [15]*

záznamů pochází z Egypta, Persie a Číny. Ve starověku bylo prokázáno archeologickými nálezy, že měření průtoku vody, dodávané do měst, se měřil pomocí dýz. Například ve starém Římě bylo v době největšího rozkvětu celkem 19 akvaduktů o celkové délce 400 km, které dodávaly 600 až 800 litrů vody na jednoho obyvatele denně [5]. V přepočtu na tehdejší počet obyvatel to bylo až 1 milión metrů krychlových denně. Tehdejší objemová míra se jmenovala modius (nádobu = 8,73 litrů), kterým se měřilo množství obilí. Tekutiny se skladovaly v amforách (amfora = 26,23 litrů) [17], které zároveň tvořili i měřidlo. Paradoxem je, že římský občan dostával peníze za to, že žije v Římě a má status občana Říše Římské. Dnes je to naopak. Za tyto služby platíme. Pro správné měření, se však museli zvolit vhodné jednotky. Tehdy, i dnes, se volili různé jednotky pro měření průtoku, ale jedna jednotka byla vždy stejná. Byla to cena za dopravované množství. Cena je jednotka velmi proměnlivá, ale srozumitelná pro všechny. Je to vlastně hlavní jednotka, pomineme-li technologické důvody, kvůli které se veškerá měření dělají. Porovnáváme náklady za dodanou energii a ztrátovost při její přeměně a dopravě. Dochází samozřejmě i k jiným typům měření, např. kvůli ekologickým procesům, ale i ty, jsou ve výsledku zohledněny cenou. V 19. století došlo k nárůstu potřeb měření průtoku, a tak došlo k rozvoji způsobů měření a měřicích zařízení. K poslednímu upřesnění a sjednocení jednotek nejen měření průtoku, ale jednotek SI a systému měření, došlo v roce 1960 [2] na XI. Generální konferenci pro míry a váhy, ta rozhodla o přijetí Mezinárodní soustavy jednotek SI (Système International d'Unités) s platností v tehdejší ČSSR od roku 1980, kdy byla zákonem přijata soustava mezinárodních jednotek SI [6].



## 2.2 Měření průtoku obecně

Způsoby měření průtokového množství tekutin můžeme roztrždit do různých kategorií. Začneme tím, co je to průtok? Průtok je množství tekutiny dopravované z bodu A do bodu B. Výsledkem měření a výpočtů, jsou dvě hodnoty: 1) Hmotnost tekutiny (hmotnostní průtok) a 2) objemový průtok. Abychom mohli odečítat hodnoty musí trať obsahovat senzory průtoku, její rozdělení pak můžeme vidět na obrázku 2-1. Základní členění senzorů, je podle použitého způsobu či metody měření. Budu se jimi zabývat v kapitole 2.5 a níže. Můžeme však použít i jiné rozdělení např.: podle fyzikálního principu a konstrukce měřidla, podle druhu měřené tekutiny atd. Chtěl bych zmínit i rozdělení průtokoměrů na energii přidávající a energii spotřebovávající. Jsou to průtokoměry, které tekutině dodávají kinetickou energii (pohánějí ji) a zároveň měří její množství. Většinou se jedná o různé dávkovače, nebo směšovače. Průtokoměry spotřebovávající energii, které jsou mnohem běžnější, kde tekutina naopak ztrácí tlak, teplotu, rychlost atp. Jedná se především o škrticí měřicí orgány [18].

## 2.3 Vztahy a definice měření průtoku

Tekutina je beztvářá látka, která při pohybu (tok) získá tvar obrysu nádoby, nebo potrubí, kterým je vedená. Jako tekutiny se chovají kapaliny, plyny a páry.

### 2.3.1 Rychlost pohybující se částice

Rychlost tekutiny  $v$  je vektor, směr vektoru je stejný se směrem tečny k dráze částice a jehož velikost je dána poměrem dráhy  $l$  k času  $t$ , potřebnému k jejímu proběhnutí.

$$\bar{v} = \frac{l}{t} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (2.1)$$

### 2.3.2 Objemový průtok tekutiny

Objem tekutiny  $V$ , který proteče určitou plochou průřezu potrubí za čas  $t$ , je označován jako objemový průtok  $q_v$ .

$$q_v = \frac{V}{t} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (2.2)$$

### 2.3.3 Hmotnostní průtok

Hmotnostní průtok (tok)  $q_m$  je průtok, u něhož je množství tekutiny vyjádřeno hmotností, je to hmotnost tekutiny  $m$ , která byla dopravena za určitý čas  $t$ .

$$q_m = \frac{m}{t} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (2.3)$$

### 2.3.4 Reynoldsovo číslo ( $R_e$ )

Reynoldsovo číslo  $R_e$  je kritérium používaným pro posouzení druhu proudění tekutiny, udávající poměr mezi setrvačnými a třecími silami v tekutině [10]. Reynoldsovo číslo je vztah, kdy kinematickou viskozitu  $\nu$  vynásobíme průměrem potrubí, jehož průměr  $D$  má pravidelný kruhový průřez a podělíme rychlostí částice tekutiny  $v$ . Reynoldsovo číslo je kritická hodnota  $Re_{krit} = 2230 [-]$ . Z toho plyne, že je-li  $Re \leq Re_{krit}$  jedná se o proudění laminární a je-li  $Re \geq Re_{krit}$  jedná se o proudění turbulentní. U předchozího příkladu desky obtékané paralelním proudem se spočítá Reynoldsovo číslo z rychlosti volného proudu  $v_\infty [m \cdot s^{-1}]$ , a kinematické viskozity  $\nu [m^2 \cdot s^{-1}]$ . V tomto případě bude uvažováno o proudění jako o jednorozměrném.

$$Re_D = \frac{v \cdot D}{\nu} [-] \quad (2.4)$$

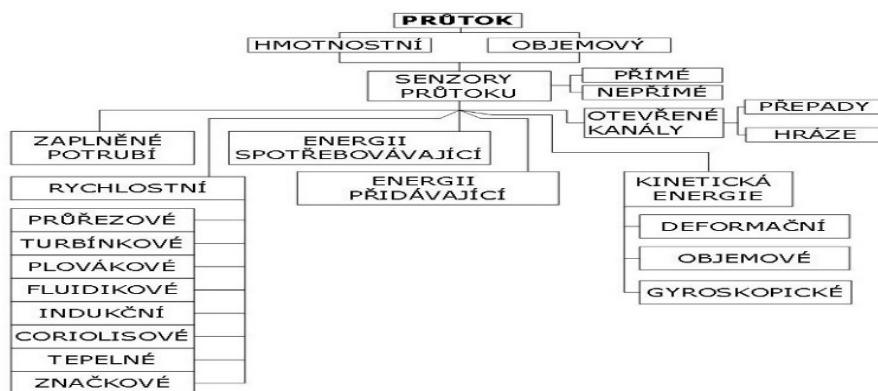
### 2.3.5 Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice je vztah odvozený z mechaniky tekutin, který vyjadřuje zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění pro ideální kapaliny v uzavřené trubici [19]. Základní slovní definice Bernoulliho rovnice je: Místo s větším průřezem, v němž proudí kapalina má větší tlak, ale menší rychlost. Zatímco místo s menším průřezem má kapalina menší tlak, ale větší rychlost. Součet kinetické a tlakové potenciální energie kapaliny o jednotkovém objemu je ve všech částech vodorovné trubice stejný.

$$E_k + E_p = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + p \cdot V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot v^2 + p \cdot V = konst. \quad (2.5)$$

## 2.4 Rozdělení měřicích orgánů

Celým rozdělením senzorů dle obrázku 2-1 se nechci zde zabývat. Zadáním práce je oblast zúžena jen na senzory průtokové rychlostní, kde popíšu ty nejčastěji používané čl. 2.4.1.


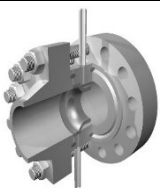
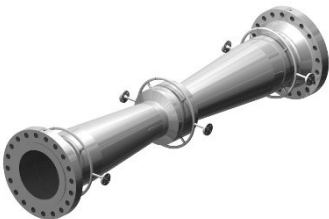

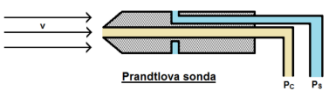


Obrázek 2-2 Rozdělení senzorů [16]

### 2.4.1 Měření průtoku škrticími orgány-metody

Průmyslové průtokoměry škrticí jsou založeny na měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem, ne však výhradně. Tato metod je nepřímá. Základní skupina těchto průtokoměrů je nazývána škrticí orgány. Patří zde:

Tabulka 2-1 Příklady škrticích orgánů[v.t.]

č.1		Centrická clona	Centrická clona je tenký kotouč s kruhovým otvorem, se středem umístěným v ose potrubí. Clona, je nejčastěji v potrubí vsazená v přírubovém spoji.
č.2		Dýza	Škrticí orgán se zaoblenou vtokovou a válcovitou výtokovou stranou. Je odolná vůči působení vysokých teplot a tlaku s velmi dlouhou dobou životnosti v závislosti na použitém materiálu.
č.3		Venturiho trubice	Je typ měřicího orgánu, kde je tekutina zrychlena v kuželovém konfuzoru. V další části trubice, difuzoru, se tlak vrací na úroveň tlaku před zúžením, se ztrátou. Výhodou Venturiho trubice je menší tlaková ztráta než u clony a velká přesnost měření. Nevýhodou je cena a menší rozsah způsobu měření, proto se Venturiho trubice využívá jen málo.
č.4		Pitotova trubice	Pitotova trubice je měřicí přístroj, který umožňuje měřit rychlost proudění média jejím převedením na tlak a následným tlakovým rozdílem.
č.5		Prandtlůva sonda	Principy snímání aerometrických veličin, jako je celkový a statický tlak, který se zvyšující rychlostí nijak nemění. Je kombinací Pitotovy trubice a statické sondy

Obrázek 2-3 Centrická clona [3], viz č.1

Obrázek 2-4 Dýza [3], viz č.2

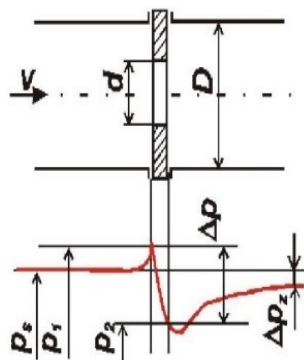
Obrázek 2-5 Venturiho trubice [3], viz č.3

Obrázek 2-6 Pitotova trubice [13], viz č.4

Obrázek 2-7 Prandtlůva sonda [14], viz č.5

### 2.4.2 Podstata měření průtoku škrticími orgány

Podstatou měření průtoku škrticími orgány je měření rozdílu tlaku před a za prvkem měřicího zařízení. Tyto poměry v měřeném úseku při proudění tekutiny popisuje Bernoulliho rovnice (5).



$v$ - rychlost proudění

$d$ - průměr otvoru škrticího orgánu

$D$  - průměr potrubí

$p_s$ - vstupní statický tlak

$p_1$ - tlak před škrticím orgánem (snímač)

$p_2$ - tlak za škrticím orgánem (snímač)

$\Delta p$ - diferenční tlak ( $p_1 - p_2$ )

$\Delta p_z$ - trvalá tlaková ztráta

Obrázek 2-8 Centrická clona-schéma [4]

### 2.4.3 Průtokoměry se škrticími orgány měření pomocí clony- charakteristika

Tekutina protékající potrubím narazí na stěnu škrticího orgánu tlak se zvýší a sníží se rychlost. Ve chvíli průchodu zmenšeným otvorem clony dojde ke zrychlení a poklesu statického tlaku v místě clony. Minimální statický tlak je v místě maximální rychlosti proudění. Universální škrticí orgán, který by se dal použít pro všechny technologie či tekutiny, neexistuje. Proto byla vyvinuta řada tvarů primárních průtokoměrů. Rozdíl tlaků je přímo úměrný druhé mocnině rychlosti proudění závislé na tvaru vložené clony. Ze změřeného rozdílu tlaků, lze vypočítat objemový, nebo hmotnostní průtok (viz vztah 2.6) danou částí potrubí. Obecné tvary rovnic pro výpočet otvoru v centrické cloně sestavené dle normy ČSN EN ISO 5167-1 [10]. Průtokové součinitele jsou určovány experimentálně a průměrné hodnoty jsou uvedeny v tabulkách nebo grafech. Nejistoty hodnot se mění v rozmezí pouze od 0,5 % do 3 %. Pro obvyklé využití stačí korekce měřených hodnot výpočtem a není nutné zařízení kalibrovat.

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1} \quad (2.6)$$

#### **2.4.4 Důvody měření průtoku**

Měření průtoku je prováděno primárně z důvodu fakturačních, ale jsou i další důvody, např. technologické, kdy je zapotřebí zajistit potřebné množství dopravované tekutiny do technologického procesu a potřebujeme kontinuálně zjišťovat stav dopravovaného množství. Provozní i fakturační měření má své opodstatnění. Pro fakturační měření se používají normalizovaná měřidla, jejichž konstrukce a parametry spadají pod příslušnou evropskou, nebo státní normu. Musí být dodrženo tzv. schválení typu TCM. Týká se to celé řady oborů, kde potřebujeme zajistit správné dopravované množství. Strojírenská výroba, energetika, důlní těžba, chemický průmysl, zdravotnictví, tam všude je důležité měřit množství dopravované tekutiny. V současné době je místo centrických clon často používán jiný způsob měření, např.: indukční, nebo ultrazvukové průtokoměry. Ty však mají své omezení a nedají se využít při každém způsobu měření. Nejuniverzálnějším a nejvíce rozšířeným měřidlem, vytvářející tlakovou diferenci, jsou právě clony a dýzy.

### **3. Praktická část**

V praktické části bude proveden návrh a výpočet centrické clony dle zadání. Pro zvolené zařízení a daný průměr potrubí. Tekutina je daná zadáním. Clona bude konstrukčně navržena a průměr potrubí bude zvolen. Konstrukce centrické clony je normalizovaná a řídí se normou ČSN EN ISO 5167-1 a 2 [10] a [11].

#### **3.1 Úvod do metody měření centrickou clonou.**

Princip měření je v instalaci primárního prvku (primárním prvkem se v tomto případě rozumí centrická clona) do potrubí, kterým je v celém průřezu vedena tekutina. Instalací takového prvku způsobíme rozdíl statických tlaků mezi přední a zadní stranou primárního prvku. Průtok může být určen naměřenými hodnotami z této tlakové difference a z předem známých vlastností dopravované látky (tekutiny). Nedílnou součástí jsou i podmínky, za kterých lze primární prvek použít jako jsou teplota, tlak a hustota tekutiny.

#### **3.2 Výhody a nevýhody clon**

Výhodou centrických clon je jednoduchost konstrukce a vysoká provozní spolehlivost. Jednoznačnost definování této clony normou ČSN EN ISO 5167 – 2 [11]. Jejich využití je velmi rozsáhlé a patří k nejširšímu ve všech oblastech měření průtoku.

#### **3.3 Technické parametry kompresoru**

Kompresor byl zvolen podle dostupnosti na trhu a podle možnosti jeho užití v praxi. Je to šroubový kompresor českého výrobce. Pracovní látka stlačený vzduch. Technický list (Tabulka 3-1).

Tabulka 3-1 Technický list kompresoru dle výrobce [příloha E]

Typ kompresoru		Stanice SE 25
Výkonnost kompresoru	(m <sup>3</sup> /h)	35
	(kg/h)	45,15
Jmenovitý výtlačný přetlak	(MPa)	1 MPa
Sací tlak absolutní	(bar)	1
Sací teplota	(°C)	20
Druh vzdušiny		vzduch
Počet stupňů		1
Jmenovité otáčky	(min <sup>-1</sup> )	2 750
Teplota na výstupu	(°C)	27
Příkon na hřídeli kompresoru	(kW)	4
Stupeň ochrany		IP 54
Max. počet zapnutí kompresoru	(h <sup>-1</sup> )	15
Výstup stlačeného vzduchu	Regulátor	ano
	Filtr	ano
	Připojení (I-vnitřní závit)	G 1/2" -I
Elektromotor:	Výkon (kW)	4
	Otáčky (min <sup>-1</sup> )	2750
	Napětí (V)	3 x 400
	Kmitočet (Hz)	50
	Proud (A)	8,3

### 3.4 Terminologie a pojmy

Terminologie a pojmy jsou převzaty z normy ČSN EN ISO 5167-1 a 2 [10] a [11].

#### 3.4.1 Měření tlaku

Pro způsob měření průtoku tekutiny byla zvolena prstencová dutina, a clonový kotouč s vyvrtaným otvorem na střed a zalícovanou s povrchem samotného potrubí. Pro tlak  $p$ , byl zvolen způsob měření tlaku, který můžeme naměřit tlakoměrem, připojeným k soustavě na odběr tlaku. Výchozí údaje pochází od výrobce kompresoru. Statický tlak proudící tekutiny (vzduch) v potrubí. Aby se dosáhlo co nejmenší chyby je snímač tlaku jen jeden. Výpočet bude navržen tak, aby bylo možné měnit parametry, jak podle potřeb provozu, tak podle měnících se parametrů dle typu kompresoru.

### 3.4.2 Teplota

Teplota tekutiny se měří před a za primárním prvkem. Pro účely této práce výpočet bude vycházet z laboratorních podmínek a údajů od výrobce kompresoru. Vzduch bude mít teplotu 27 °C.

### 3.4.3 Primární prvek

Norma ČSN EN ISO 5167-1,2 [10],[11] se zabývá více způsoby konstruování centrických clon a měření průtoku, z mého zadání bude popsán primární prvek a tou je centrická clona.

### 3.4.4 Clona – clonový kotouč

Nejmenším otvorem primárního prvku se nazývá clonou. Je to tenká deska. Jejíž tloušťka je výrazně menší v porovnání s průměrem otvoru měřicího průřezu. Na straně prvního odběru tlaku je přední strana clonového kotouče ostrá a pravoúhlá. Centrická clona je tenký kotouč s kruhovým otvorem se středem umístěným v ose potrubí. Clona je nejčastěji v potrubí vsazená v přírubovém spoji. Těsnicí plochy lze na clonách kromě norem ČSN zhotovit podle norem EN, DIN, GOST, amerických norem ASME a ANSI nebo podle zadání a požadavku odběratele. Centrickou clonu je možno vyrobit i v tzv. vevařovaném provedení, jeho součástí jsou uklidňující délky potrubí, před clonovým kotoučem. Výhodou svarového vsazení do potrubí je materiálová úspora na přírubách a minimalizace netěsností v přírubovém spoji.

## 3.5 Metoda měření a výpočty (princip)

### 3.5.1 Metoda měření

Metoda měření pomocí zabudování clony (primárního prvku) do potrubí, kterým v celém průřezu protéká tekutina (vzduch). Instalací clony způsobíme rozdíl statických tlaků v potrubí, mezi přední stěnou clony a otvorem (hrdlem). Hrdlo clony bude mít stejný tvar, jako průřez potrubí. Hmotnostní průtok v mém případě udává výrobce kompresoru, viz. Tabulka 3-1, ale můžeme jej vypočítat ze vzorce (2.6). Vzorec (2.6) rovněž upravím tak, aby na levé straně bylo  $d$  a poměr průměrů clony zvolím, tak aby splňoval podmínky normy ČSN EN ISO 5167-2 [11].

$$d = \sqrt{\frac{q_m}{\left(\frac{c}{\sqrt{1-\beta^4}}\right) \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1}}} \quad (3.1)$$



### 3.6 Určení hustoty a statického tlaku

#### 3.6.1 Obecné podmínky

Stanovení hustoty tekutiny, statického tlaku a její teploty a viskozity je přijatelná jakákoliv metoda, která spolehlivě stanoví tyto hodnoty.

#### 3.6.2 Statický tlak

Stanovení statického tlaku se děje bodovým odběrem, v jednom místě v potrubí. Pro účel mé práce vycházím z údajů výrobce kompresoru.

#### 3.6.3 Hustota tekutiny

Hustotu vzduchu při normálních podmínkách 0 °C a  $p = 101325$  Pa se stanovuje pomocí výpočtu příslušné stavové rovnice vychází z  $\rho = 1,2959 \text{ kg.m}^{-3}$ . Zjištěná provozní teplota odpovídá zadání výrobce, je 27 °C. Hustota vzduchu při 27 °C. Tlak  $p$  podílem s molární plynovou konstantou  $r$ , která se vynásobí teplotou  $T$ .

$$p \cdot v = r \cdot T \rightarrow p \cdot \frac{1}{\rho} = r \cdot T \rightarrow \rho = \frac{p}{r \cdot T} \quad (3.2)$$

### 3.7 Volba potrubí a příruby

Potrubí bude dopravovat čistý stlačený vzduch. Průměr potrubí volím: Trubka ocelová bezešvá běžná dle ČSN EN 1092-1 – 11 343.0, jmenovitá světlost DN 50 jmenovitý tlak PN16,  $D = 54,5$  mm, tloušťka stěny 2,9 mm. Pro daný tlak a teplotu je materiál trubky dostačující. Teplota na výstupu (27 °C) a teplotu okolí 20 °C, je možno zanedbat z hlediska roztažnosti materiálu. Nebude tedy počítáno s Joule Thomsonovým součinitelem dle ČSN EN ISO 5167-1 čl. 3.3.4 [10]. Odběr tlaku bude probíhat koutovým odběrem, dle normy ČSN EN ISO 5167-2 [11]. Příruba bude typizovaná, ale upravená z uhlíkové oceli 11 343

### 3.8 Volba a konstrukce centrické clony

Centrickou clonu volím s komorovým (koutovým) odběrem. Tělo centrické clony se vyrábí z nerezové oceli ČSN 10088-1 1.4301 (AISI 304) [17]. Tvoří jej kotouč, do kterého se vrtá otvor. Počet otvorů a tvar se může lišit, ale podle zvolené centrické clony, bude vyvrtán jen jeden otvor na střed kotouče. Z konstrukčního hlediska, je clona jednoduchý prvek. Způsob užití a výpočet definuje norma ČSN EN ISO 5167-1 [10]. Prstence s odběrovými komorami budou stejného materiálu jako clona ČSN 10088-1 1.4301 (AISI 304) [17], aby se zabránilo nepřesnosti při roztažnosti jiných druhů materiálů. Užití komorového měření je výhodnější z hlediska možnosti servisních oprav a případné výměny prstenců s odběrovými komorami. Konstrukce centrické clony je normalizovaná. Při navrhování a výpočtech parametrů centrické clony s komorovým odběrem bude užitá norma ČSN EN ISO 5167-1 [10] a ČSN EN ISO 5167-2 [11].

#### 3.8.1 Všeobecný popis

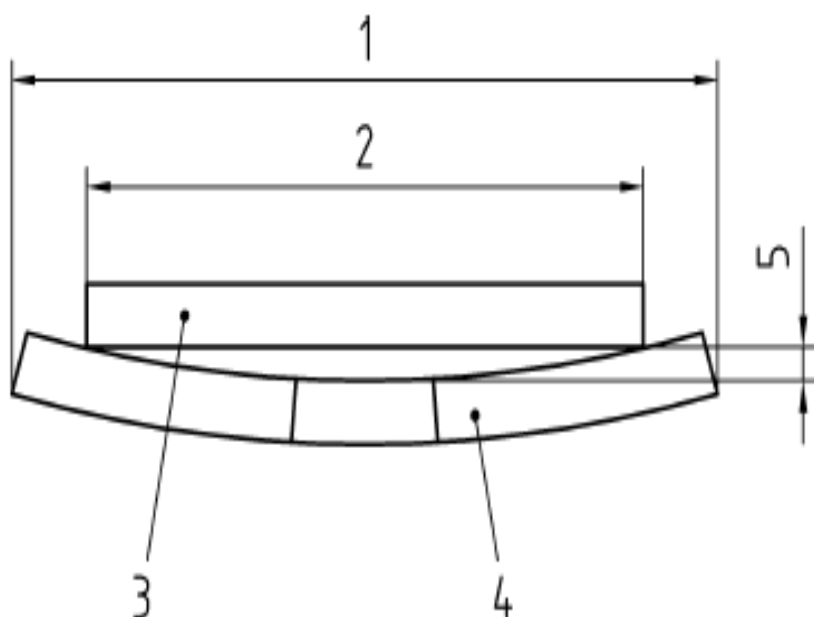
Clona s komorovými koutovými odběry, se vyrábí v rozsahu jmenovitých světlostí. Použití komorové clony pro vyšší tlaky, není vzhledem k jejímu konstrukčnímu provedení doporučováno. Jejími hlavními částmi jsou dvoudílná obruba s prstencovou komorou a clonový kotouč, jenž je sevřen mezi dvěma prstenci a díly obruby, upevněn šrouby a utěsněn těsněním. Z prstenců je vyveden odběr tlaku. S plasticitou a prohnutím clonového kotouče způsobené rozdílem tlaku, nebo instalační deformací, se může počítat, nesmí však přesáhnout průhyb  $\leq 1 \%$ . Pokud není stanoveno jiné provedení, či způsob instalace, týkají se tyto konstrukční kritéria clony umístěné v přírubách.

#### 3.8.2 Výhody a nevýhody centrické clony

Její hlavní výhodou je snadná konstrukce a normalizované parametry dané normou ČSN ISO 5167-2 [11]. Jsou určeny k nejširšímu využití ve všech oblastech měření průtoku. clona s komorovými koutovými odběry, se vyrábí v rozsahu jmenovitých světlostí DN 15 až DN 1000 pro jmenovité tlaky do PN 40, maximálně do PN 100. To znamená, že centrická clona má velmi rozsáhle využití v mnoha odvětvích průmyslové výroby. Centrická clona s odběrovými prstenci je poskládaná ze tří dílů a každá z těchto dílů je nahraditelný a vyměnitelný.

### 3.8.3 Přední strana clony-A

Přední strana kotouče (strana A) tvoří rovinu, která musí mít drsnost  $R_a < 10^{-4} \cdot d \rightarrow$ , viz Tabulka 3-2 a 3-3, a to ve chvíli, kdy v potrubí není žádný tlakový rozdíl. V případě, že nedojde k deformaci při instalaci, je možno tuto rovinu měřit po vyjmutí z potrubí. Kotouč lze považovat za rovný, pokud mezera mezi kotoučem a rovinným pravítkem (obrázek 3-1) je menší než  $0,005 \cdot \frac{(D-d)}{2}$ , tzn. sklon je  $> 0,5 \%$ , pokud odchází ke zkoušce clony před instalací do měřicího místa.



Obrázek 3-1 Průhyb centrické clony [11]

Legenda – měření rovinnosti kotouče:

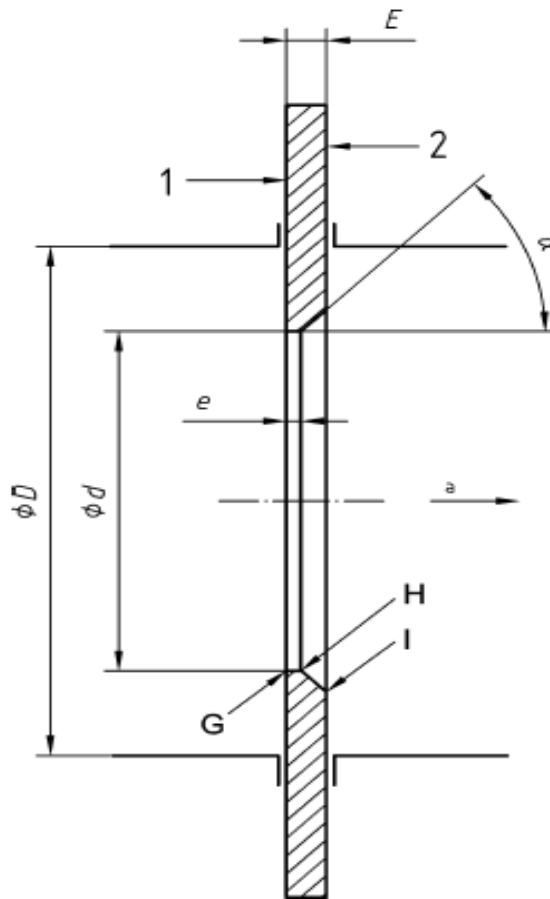
1 vnější průměr clony

2 vnitřní průměr potrubí

3 přímkové pravítko

4 clona

5 úchylka rovinnosti (měřena od hrany otvoru clony)



Obrázek 3-2 Centrická clona [11]

Legenda – hlavní parametry pro konstrukci centrické clony jsou:

$D$ – vnitřní průměr potrubí

$d$ – průměr otvoru clony

$G$ – hrana otvoru clony

$e$ – tloušťka clony v otvoru

$E$ – celková tloušťka clony

$H, I$ – hrana clony

$\alpha$ – úhel zkosení otvoru clony

### 3.8.4 Zadní strana clony-B

Zadní strana B, kotouče primárního prvku, musí být rovinná a rovnoběžná s přední stranou. Není nutné dodržet drsnost povrchu zadní strany stejnou, jako na přední straně.

### 3.8.5 Tloušťka clony $e$

Tloušťka clony v nejužším místě musí být volena mezi  $0,005 \cdot D \leq e \leq 0,02 \cdot D$ . Volím  $0,018633 \cdot D$ . Rozměr 0,018633 jsem zvolil, aby vyšlo celé číslo.

$$e = 0,018633 \cdot D = 0,018633 \cdot 54,5 = 1,015 \text{ [mm]} \quad (3.3)$$

$$e \doteq 1,0 \text{ [mm]}$$

### 3.8.6 Tloušťka clony $E$

Síla (tloušťka)  $E$  clonového kotouče musí být  $e < E < 0,05 \cdot D$ . V případě že nastane případ kdy  $50 \text{ mm} < D < 64 \text{ mm}$ , připouští se tloušťka  $E \leq 3,2 \text{ mm}$ . Pro výpočet  $E$ , vynásobíme koeficient 0,05 vnitřním průměrem potrubí  $D$  a výsledná celková tloušťka clony, pak bude zanesena do výkresu konstrukce primárního prvku.

$$E = 0,05 \cdot D = 0,05 \cdot 54,5 = 2,725 \text{ [mm]} \quad (3.4)$$

$$E \doteq 3 \text{ [mm]}$$

### 3.8.7 Hrana clony $G$

Přední hrana  $G$  clonového kotouče musí být ostrá. Pokud zaoblení není větší než  $0,004 \cdot d$ , bere se hrana jako ostrá. Na hranu  $H$  a  $I$  (Obrázek 3-2), nejsou kladeny žádné zvláštní požadavky.

$$G = 0,004 \cdot d = 0,004 \cdot 13,077 = 0,052 \text{ [mm]} \quad (3.5)$$

### 3.8.8 Úhel zkosení $\alpha$

Jestliže tloušťka  $E$  primárního prvku je větší než tloušťka  $e$  otvoru clony, musím být kotouč na zadní straně  $B$  zkosen. Zkosená plocha musí být hladce opracována. Úhel zkosení  $\alpha$  musí být  $45^\circ \pm 15^\circ$ .

### 3.8.9 Odběr tlaku v cloně

Byl zvolen odběr tlaku komorovým odběrem s prstencovou štěrbinou v cloně, viz (Obrázek 3-3). Minimální průměr prstencové štěrbiny a odběru se volí tak, aby nedocházelo k ucpání. Tekutina je považována za čistou, ale vždy sebou nese částice prachu, které se mohou usazovat a docházet ke zkreslení měření.

#### 3.8.10 Šířka prstencové štěrbiny $a$

Specifikace šířky prstencové štěrbiny  $a$  je dána podmínkou, pro  $\beta < 0,65$ :  $0,005 \cdot D \leq a \leq 0,03 \cdot D$ . Jestli  $D < 100 \text{ mm}$ , potom  $a$  můžeme volit až 2 mm pro libovolné  $\beta$ . Dle výpočtu bude zvolena vzdálenost mít hodnotu  $0,01 \cdot D$ . Pro šířku prstencové štěrbiny bude zvolen rozměr 1 mm. Tím, že tekutina prochází filtry, bere se jako čistá a opatření proti zanášení, je čištění v pravidelných intervalech. Vnitřní průměr potrubí  $D$  vynásobím koeficientem 0,01 a z výsledné hodnoty bude zvolena velikost prstencové štěrbiny 1 mm s dostatečnou rezervou proti zanášení a v souladu s normou [11].

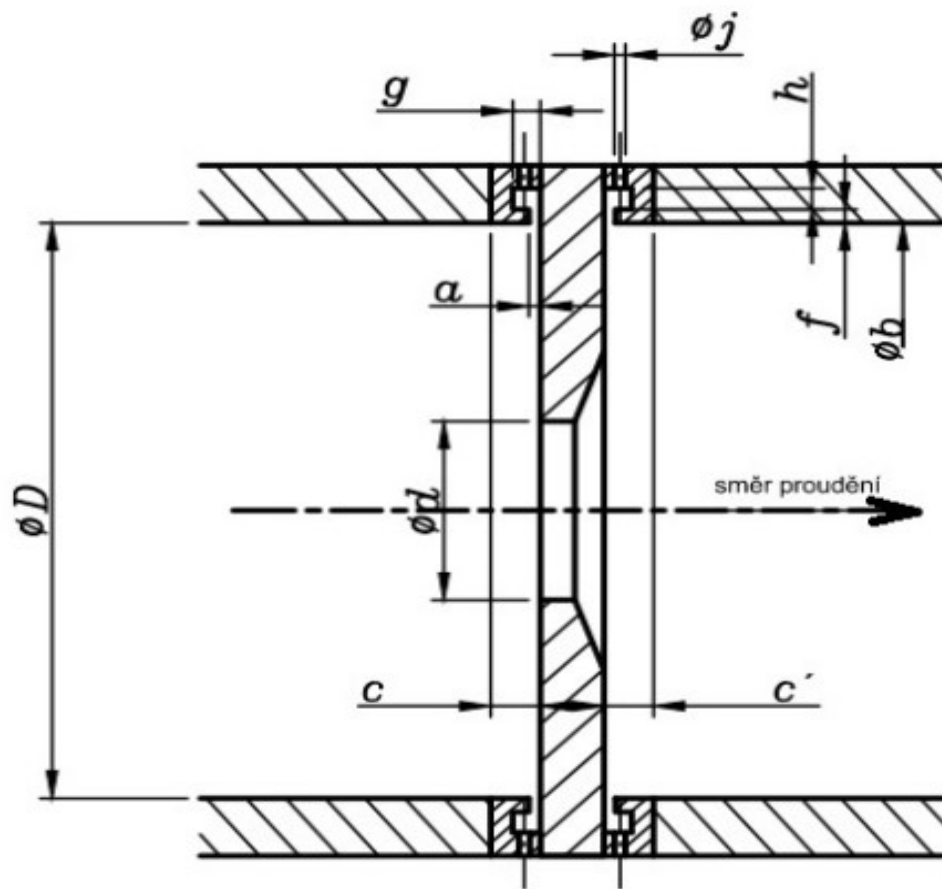
$$a = 0,01 \cdot D = 0,01 \cdot 54,5 = 0,545 [\text{mm}] \quad (3.6)$$

$$a \doteq 1 [\text{mm}]$$

#### 3.8.11 Poměr průměrů $\beta$

Důležitým parametrem je průměr clony  $d$ , jehož hodnota musí vycházet z prvotní volby a poté z měření, alespoň čtyřech průměrů ve vzájemně svírajících, přibližně stejných úhlech. Při měření nesmí dojít k poškození čelní hrany ani vnitřních povrchů samotného otvoru primárního prvku. Podmínky dané normou [11] jsou:  $\beta = 0,1 < d/D < 0,75$ . Průměr clony vydělíme vnitřním průměrem potrubí. Může být zvolen průměr potrubí, anebo poměr.

$$\beta = \frac{d}{D} [-] \quad (3.7)$$



Obrázek 3-3 Clona s koutovým odběrem s prstencovou štěrbinou [11.]

Legenda

- $a$  - šířka prstencové štěrbiny
- $b$  - průměr komorového prstence
- $D$  - vnitřní průměr potrubí
- $c$  - délka předního prstence
- $c'$  - délka zadního prstence
- $d$  - průměr otvoru clony
- $f$  - hloubka štěrbin
- $g/h$  - rozměr prstencové štěrbin
- $j$  - průměr komorového odběru

### 3.8.12 Prstencová štěrbina-plocha

Prstencová štěrbina bude po celém obvodu, nebude nikde přerušena. Šířka prstencové štěrbiny clony, je po celém obvodu potrubí. V případě, že tomu tak není, musí plocha štěrbiny tvořit minimálně  $12 \text{ mm}^2$ . Podmínka plochy  $\geq 12 \text{ mm}^2$  bude splněna. Plocha průřezu  $g \cdot h$  prstencové komory musí být větší nebo rovna polovině celkové plochy otvoru spojujícího komoru s vnitřkem potrubí.  $g = 9 \text{ mm}$ ;  $h = 5 \text{ mm}$

$$g \cdot h = 9 \cdot 5 = 45 [\text{mm}^2] \quad (3.8)$$

### 3.8.13 Prstencová štěrbina-rozměr $b$

Vnitřní průměr  $b$  prstenců komor musí být větší nebo rovný průměru  $D$ , aby bylo jisté, že nebudou přesahovat do potrubí, ale musí být menší, nebo rovný  $b \leq 1,04 \cdot D$ . Kromě toho, musí být splněna následující podmínka:  $\frac{b-D}{D} \cdot \frac{c}{D} \cdot 100 < \frac{0,1}{0,1-2,3 \cdot \beta^4}$ . Hodnota 1,04 násobena vnitřním průměrem potrubí  $D$  a bude volena tak, aby splnila podmínku.

$$b = 1,04 \cdot D = 1,04 \cdot 54,5 = 56,68 [\text{mm}] \quad (3.9)$$

průměr  $b$  zvolen 54,5 mm. Z praxe odpovídá vnitřnímu průměru potrubí, aby nedocházelo ke změně proudění a větším chybám v měření.

### 3.8.14 Prstencová štěrbina-rozměr $c, c'$

Rozměr  $c$  a  $c'$  zadního a předního prstence musí splňovat podmínku:  $c, c' \leq 0,5 \cdot D$ . Kdy hodnota 0,5 bude násoben vnitřním průměrem potrubí  $D$ .

$$c, c' \leq 0,5 \cdot D \rightarrow 0,5 \cdot 54,5 = 27,25 [\text{mm}]$$

$$27,2 \leq 27,25 [\text{mm}] \quad (3.10)$$

Zvolen rozměr 27,2 mm.

Porovnání podmínky:

$$\frac{b-D}{D} \cdot \frac{c}{D} \cdot 100 < \frac{0,1}{0,1-2,3 \cdot \beta^4}$$

$$\frac{54,5 - 54,5}{54,5} \cdot \frac{27,2}{54,5} \cdot 100 < \frac{0,1}{0,1-2,3 \cdot 0,2^4} \rightarrow 0 < 1,038$$

Podmínka splněna.



### 3.8.15 Prstencová štěrbinová rozměr $f$

Hloubka  $f$  štěrbinové musí být  $f \geq 2$  [mm]. Bude předepsána 3,5 [mm].

### 3.8.16 Prstencová štěrbinová rozměr $j$

Odběry před a za clonou, které spojují komory prstence se sekundárními prvky, jsou kruhové otvory o průměru:  $j = 4 - 10$  [mm]. Zvolena  $j = 4$  [mm]

## 3.9 Součinitelé centrické clony

Normalizovaná centrická clona se smí používat pouze v souladu s normou a musí splňovat tyto podmínky:

Dle ČSN EN ISO 5167-2 čl.: 5.3.1 [11]:

- a)  $d \geq 12,5$  mm (hodnota bude vypočítána);
- b)  $50 \text{ mm} \leq D \leq 1\,000$  mm;
- c)  $0,1 \leq \beta \leq 0,75$ ;
- d)  $Re_D \geq 5\,000$  pro  $0,1 \leq \beta \leq 0,56$ ;
- e)  $Re_D \geq 16\,000 \beta^2$  pro  $\beta > 0,56$ .

### 3.9.1 Součinitel průtoku $C$

Výpočet  $C$  vychází z Reader-Harris/Gallagherovou rovnicí [11], kdy  $C$  je  $f(\beta, Re_D, A, M', L_1, D)$ . Kdy  $\beta$  je poměr průměrů (7) a pro první fázi výpočtu můžu zvolit dle podmínky.  $Re_D$  je Reynoldsovo číslo vypočtené vzhledem k  $D$  (4). Hodnoty  $L_1, L_2$  jsou podíly vzdálenosti předního odběru tlaku od přední ( $L_1$ ) strany clony a zadního odběru tlaku od zadní ( $L_2$ ) strany clony. Pro koutové odběry platí že  $L_1 = L_2 = 0$ . Pro  $M'_2$  platí vztah, který je  $M'_2 = \frac{2L'_2}{1-\beta} = 0$ . Hodnota  $A$  bude vypočtena ze vztahu -  $A = \left(\frac{19000 \cdot \beta}{Re_D}\right)^{0,8}$ .

$$C = 0,5961 + 0,0261 \cdot \beta^2 - 0,216 \cdot \beta^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \cdot \beta}{Re_D}\right)^{0,7} + (0,0188 + 0,006 \cdot A \cdot \beta^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0,3} + (0,043 + 0,080 \cdot e^{-10L_1} - 0,123 \cdot e^{-7L_1}) \cdot (1 - 0,11 \cdot A) \frac{\beta^4}{1-\beta^4} - 0,031 \cdot (M_2 - 0,8 \cdot M_2'^{1,1}) \cdot \beta^{1,3} + 0,011(0,75 - \beta) \cdot \left(2,8 - \frac{D}{25,4}\right) \quad (3.11)$$

### 3.9.2 Expanzní součinitel $\varepsilon$

Expanzní součinitel a jeho výpočet (18), je pro všechny tři typy uspořádání odběru stejný. Užívá se jen v případě, že je poměr tlaků je  $\frac{p_2}{p_1} \geq 0,75 \rightarrow \frac{0,999}{1} = 0,999 \geq 0,75$ ,. Podmínka pro užití vzorce expanzního součinitele je splněna. Hodnota součinitele je vždy velmi blízko 1, a proto tato hodnota bude zvolena.

$$\varepsilon = (0,351 + 0,256 \cdot \beta^4 + 0,93 \cdot \beta^8) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{1/\kappa} \right] \quad (3.12)$$

### 3.10 Drsnost vnitřního potrubí

Vnitřní hodnota střední aritmetické úchyly (drsnost) vnitřní stany potrubí  $R_a$  se určuje pomocí vztahu:  $\frac{10^4 \cdot R_a}{D}$ . Drsnost se určuje z databáze používaných potrubí  $R_a$  bezešvého potrubí je 0,01-0,02 mm. Zvolena 0,02 mm [8]. Drsnost se vždy požaduje před clonou, ve vzdálenosti  $10 \cdot D$ , za clonou drsnost není důležitá. Maximální drsnost bude  $\beta \leq 0,3$ ;  $\frac{10^4 \cdot R_a}{D} \leq 15$ . Výsledná hodnota musí být nižší nebo rovna než v Tabulce 1 a vyšší, než v Tabulce 3-3.

Podmínka je, že  $0,0 < 3,66 < 15$ . Podmínka splněna. Podmínka vychází z normy ČSN EN ISO 5167-2 (Tabulka 3-2 a 3-3)[11]. Hodnotu  $10^4$  vynásobena poměrem drsnosti potrubí  $R_a$  a vnitřním rozměrem potrubí  $D$ .

$$10^4 \cdot \frac{R_a}{D} = 10^4 \cdot \frac{0,02}{54,5} = 3,66 [-] \quad (3.13)$$

Tabulka 3-2 Maximální mezní hodnota drsnosti [11]

$\beta$	Tabulka 1 – Maximální hodnota $10^4 R_a/D$								
	$\leq 10^4$	$3 \times 10^4$	$10^5$	$3 \times 10^5$	$Re_D$				
					$10^6$	$3 \times 10^6$	$10^7$	$3 \times 10^7$	$10^8$
$\leq 0,20$	15	15	15	15	15	15	15	15	15
0,30	15	15	15	15	15	15	15	14	13
0,40	15	15	10	7,2	5,2	4,1	3,5	3,1	2,7
0,50	11	7,7	4,9	3,3	2,2	1,6	1,3	1,1	0,9
0,60	5,6	4,0	2,5	1,6	1,0	0,7	0,6	0,5	0,4
$\geq 0,65$	4,2	3,0	1,9	1,2	0,8	0,6	0,4	0,3	0,3

Tabulka 3-3 Minimální mezní hodnota drsnosti [11]

$\beta$	Tabulka 2 – Minimální hodnota $10^4 R_a/D$ (kde se jedna požaduje)			
	$\leq 3 \times 10^6$	$10^7$	$3 \times 10^7$	$10^8$
$\leq 0,50$	0,0	0,0	0,0	0,0
0,60	0,0	0,0	0,003	0,004
$\geq 0,65$	0,0	0,013	0,016	0,012

### 3.11 Výpočet clony první iterace

Pro výpočet clony byla vypracována tabulka v Excelu, kde podle zadaných hodnot můžu volit průměr clony tak, abych dostal nejpřesnější výstup měření, s co nejmenšími ztrátami tlaku a průtoku, parametry, které je pro technologie a potřeby procesu a dodávku tekutiny důležité dodržet. Proto budu volit průměr clony s nejmenšími ztrátami a s co nejmenší nepřesností měření. Bude zvolen poměr průměrů  $\beta$  tak, aby byly splněny ostatní podmínky normy ČSN EN ISO 5167 1 a 2 [10] a [11].

#### 3.11.1 Krok 1 - výpočet Reynoldsova čísla

Výpočet Reynoldsova čísla ze vztahu (4). Kde kinematická viskozita  $\nu$  při teplotě  $T = 300$  [K] je  $15,68 \cdot 10^{-6} [m^2 \cdot s^{-1}]$  [9] a rychlost  $v = 17,1 [m \cdot s^{-1}]$ .

$$Re_D = \frac{v \cdot D}{\nu} [-] \quad (\text{viz vztah 2.4})$$

$$Re_D = \frac{15,68 \cdot 10^{-6} \cdot 54,5}{17,1} = 59435,59 [-]$$

#### 3.11.2 Krok 2 – výpočet hustoty vzduchu

Vypočítám hustoty vzduchu ze statického tlaku  $p = 10^6 [Pa]$ , z plynové konstanty  $r = 287,1 [-]$  a provozní teploty  $T = 300$  [K]

$$p \cdot v = r \cdot T \rightarrow p \cdot \frac{1}{\rho} = r \cdot T \rightarrow \rho = \frac{p}{r \cdot T} [kg \cdot m^{-3}] \quad (\text{viz vztah 3.2})$$

$$\rho_1 = \frac{10^6}{287,1 \cdot 300} = 11,61 [kg \cdot m^{-3}]$$

**3.11.3 Krok 3 – výpočet součinitele průtoku**

Zvolen poměr průměrů  $\beta = 0,6$  kde průměr clony byl vypočítán  $d = 32,7 [mm]$  (viz vztah 3.13). Dosazeno do rovnice součinitele průtoku  $C(16)$ ;  $A = \left(\frac{19000 \cdot \beta}{Re_D}\right)^{0,8} = 0,266862[-]$ .

$$C = 0,5961 + 0,0261 \cdot \beta^2 - 0,216 \cdot \beta^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \cdot \beta}{Re_D}\right)^{0,7} + (0,0188 + 0,006 \cdot A \cdot \beta^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0,3} + (0,043 + 0,080 \cdot e^{-10L_1} - 0,123 \cdot e^{-7L_1}) \cdot (1 - 0,11 \cdot A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0,031 \cdot (M_2 - 0,8 \cdot M_2^{1,1}) \cdot \beta^{1,3} + 0,011(0,75 - \beta) \cdot \left(2,8 - \frac{D}{25,4}\right) [-] \quad (\text{viz vztah 3.11})$$

$$C = 0,5961 + 0,0261 \cdot 0,6^2 - 0,216 \cdot 0,6^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \cdot 0,6}{59435,586}\right)^{0,7} + (0,0188 + 0,006 \cdot 0,2669 \cdot 0,6^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{59435,586}\right)^{0,3} + (0,043 + 0,080 \cdot e^{-10L_1} - 0,123 \cdot e^{-7L_1}) \cdot (1 - 0,11 \cdot 0,2669) \frac{0,6^4}{1 - 0,6^4} - 0,031 \cdot (0 - 0,8 \cdot 0^{1,1}) \cdot 0,6^{1,3} + 0,011(0,75 - 0,6) \cdot \left(2,8 - \frac{54,5}{25,4}\right) = 0,615476 [-]$$

**3.11.4 Krok 4 – výpočet průměru clony**

Do rovnice (7) dosazeno příslušné  $C = 0,615476 [-]$ ;  $q_m = 0,012541667 [kg \cdot s^{-1}]$ ;  $\varepsilon = 1 [-]$ ;  $\Delta p = 1000 [Pa]$ ;  $\rho_1 = 11,60455416 [kg \cdot m^{-3}]$ .

$$d_1 = \sqrt{\frac{\frac{q_m}{C}}{\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}\right) \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1}}} [m] \quad (\text{viz vztah 3.1})$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{0,012541667}{\frac{0,615476}{\left(\frac{1}{\sqrt{1-0,6^4}}\right)} \cdot 1 \cdot \frac{\pi}{4} \sqrt{2 \cdot 2000 \cdot 11,60455416}}} = 0,012608 [m]$$

**3.11.5 Krok 5 výpočet nového poměru průměrů**

Výpočet nového poměru průměru  $\beta_1$ , který bude dosazen

$$\beta_1 = \frac{d_1}{D} [-] \quad (\text{viz vztah 3.7})$$

$$\beta_1 = \frac{0,012608}{0,0545} = 0,231343 [-]$$

Tabulka 3-4 Výpočtová tabulka první iterace[v.t.]

Výpočet centrické clony			
		hodnoty	jednotky
hmotnostní průtok - max. kompresoru 45,15 kg/h	$q_m$	0,012541667	[kg/s]
součinitel průtoku	C	0.615476235	[-]
poměr průměrů	$\beta$	0,6	[-]
vnitřní průměr potrubí	D	0,0545	[m]
průměr otvoru clony	d	0,0327	[m]
objemový průtok	$q_v$	0,001080754	[l/s]
diferenční tlak	$\Delta p$	1000	[Pa]
koef. tep. roztažnosti	$\alpha$	1	[1/K]
pracovní teplota	$t_{prac}$	27	[°C]
hustota vz. při pracovní teplotě $t_{prac}$	$\rho_1$	11,60455416	[kg/m <sup>3</sup> ]
součinitel expanze (zaokrouhleno)	$\varepsilon$	1	[-]
kinemat. Viskozita při 300 K ( $15,68 \cdot 10^{-6}$ )	$\nu$	0,00001568	[m <sup>2</sup> /s]
Reynoldsovo číslo vzhledem k D	$Re_D$	59435,58673	[-]
$Re_D$ clony		99059,31122	[-]
A		0,266861939	
Ra		0,02	
Ra/D (tabulková hodnota)		0,366972477	
rychlost v potrubí	v	17,10	[m/s]
Podíl vzdálenosti odběrného místa před a D	$L_1$	0	[-]
Podíl vzdálenosti odběrného místa za a D	$L_2$	0	[-]
Odběrová vzdálenost od clony - před	$l_1$	0	[m]
Odběrová vzdálenost od clony - za	$l_2$	0	[m]
Plynová konstanta	r	287,1	[-]
Teplota	T	273,15	[K]
izoentropický exponent kapa	$\kappa$	1,41	[-]

### 3.12 Výpočet clony druhá iterace

Pro výpočet clony budou do téže výpočtové tabulky vloženy nové hodnoty vycházející z první iterace  $\beta_1$  a znovu bude vypočítána v krocích nová hodnota.

#### 3.12.1 Krok 1 - výpočet Reynoldsova čísla

Výpočet Reynoldsova čísla ze vztahu (2.4) v druhé iteraci se nemění. Kinematická viskozita  $\nu$  při teplotě  $T = 300$  [K] je  $15,68 \cdot 10^{-6}$  [m<sup>2</sup> · s<sup>-1</sup>] a rychlost  $v = 17,1$  [m · s<sup>-1</sup>].

$$R_{eD} = \frac{v \cdot D}{\nu} [-] \quad (\text{viz vztah 2.4})$$

$$R_{eD} = \frac{15,68 \cdot 10^{-6} \cdot 54,5}{17,1} = 59435,59 [-]$$

### 3.12.2 Krok 2 – výpočet hustoty vzduchu

Hustotu vzduchu v druhé iteraci bude, ze stejného statického tlaku  $p = 10^6 [Pa]$ , z plynové konstanty  $r = 287,1 [-]$  a provozní teploty  $T = 300 [K]$ , je stejná.

$$p \cdot v = r \cdot T \rightarrow p \cdot \frac{1}{\rho} = r \cdot T \rightarrow \rho = \frac{p}{r \cdot T} [kg \cdot m^{-3}] \quad (\text{viz vztah 3.2})$$

$$\rho_1 = \frac{10^6}{287,1 \cdot 300} = 11,61 [kg \cdot m^{-3}]$$

### 3.12.3 Krok 3 – výpočet součinitele průtoku

Dosazen poměr průměrů  $\beta_1 = 0,231343$  kde průměr clony byl vypočítán  $d_1 = 12,608 [mm]$ . Dosazeno do rovnice součinitele průtoku  $C$  (3.11);  $A = \left(\frac{19000 \cdot \beta}{Re_D}\right)^{0,8} = 0,1245 [-]$ .

$$C_1 = 0,5961 + 0,0261 \cdot \beta_1^2 - 0,216 \cdot \beta_1^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \cdot \beta_1}{Re_D}\right)^{0,7} + (0,0188 + 0,006 \cdot A \cdot \beta_1^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0,3} + (0,043 + 0,080 \cdot e^{-10L_1} - 0,123 \cdot e^{-7L_1}) \cdot (1 - 0,11 \cdot A) \frac{\beta_1^4}{1 - \beta_1^4} - 0,031 \cdot (M_2 - 0,8 \cdot M_2^{1,1}) \cdot \beta_1^{1,3} + 0,011(0,75 - \beta_1) \cdot \left(2,8 - \frac{D}{25,4}\right) [-] \quad (\text{viz vztah 3.17})$$

$$C_1 = 0,5961 + 0,0261 \cdot 0,231343^2 - 0,216 \cdot 0,231343^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \cdot 0,231343}{59435,586}\right)^{0,7} + (0,0188 + 0,006 \cdot 0,1245 \cdot 0,231343^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{59435,586}\right)^{0,3} + (0,043 + 0,080 \cdot e^{-10L_1} - 0,123 \cdot e^{-7L_1}) \cdot (1 - 0,11 \cdot 0,2669) \frac{0,231343^4}{1 - 0,231343^4} - 0,031 \cdot (0 - 0,8 \cdot 0^{1,1}) \cdot 0,231343^{1,3} + 0,011(0,75 - 0,231343) \cdot \left(2,8 - \frac{54,5}{25,4}\right) = 0,612382 [-]$$

### 3.12.4 Krok 4 – výpočet průměru clony

Do rovnice (3.11) dosazeno příslušné  $C_1 = 0,0615476 [-]$ ;  $q_m = 0,012541667 [kg \cdot s^{-1}]$ ;  $\varepsilon = 1 [-]$ ;  $\Delta p = 1000 [Pa]$ ;  $\rho_1 = 11,60455416 [kg \cdot m^{-3}]$ .

$$d_2 = \sqrt{\frac{\frac{q_m}{C_1}}{\left(\frac{\pi}{4} \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1}\right) \cdot \sqrt{1 - \beta_1^4}}} [m] \quad (\text{viz vztah 3.7})$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{\frac{0,012541667}{0,615476}}{\left(\frac{\pi}{4} \cdot 1 \cdot \sqrt{2 \cdot 2000 \cdot 11,60455416}\right) \cdot \sqrt{1 - 0,231343^4}}} = 0,013077 [m]$$

### 3.12.5 Krok 5 - výpočet nového poměru průměrů

Výpočet nového poměru průměru  $\beta_1$ , který bude dosazen

$$\beta_2 = \frac{d_2}{D} [-] \quad (\text{viz vztah 3.13})$$

$$\beta_2 = \frac{0,0120908}{0,0545} = 0,239943 [-]$$

Tabulka 3-5 Výpočtová tabulka druhé iterace[v.t.]

Výpočet centrické clony		hodnoty	jednotky
hmotnostní průtok - max. kompresoru 45,15 kg/h	$q_m$	0,012541667	[kg/s]
součinitel průtoků	$C$	0,612382361	[-]
poměr průměrů	$\beta_1$	0,231342678	[-]
vnitřní průměr potrubí	$D$	0,0545	[m]
průměr otvoru clony	$d_1$	0,012608176	[m]
objemový průtok	$q_v$	0,001080754	[l/s]
diferenční tlak	$\Delta p$	1000	[Pa]
koef. tep. roztažnosti	$\alpha$	1	[1/K]
pracovní teplota	$t_{prac}$	27	[°C]
hustota vz. při pracovní teplotě $t_{prac}$	$\rho_1$	11,60455416	[kg/m <sup>3</sup> ]
součinitel expanze (zaokrouhleno)	$\varepsilon$	1	[-]
kinemat. Viskozita při 300 K ( $15,68 \cdot 10^{-6}$ )	$\nu$	0,00001568	[m <sup>2</sup> /s]
Reynoldsovo číslo vzhledem k D	$Re_D$	59435,58673	[-]
$Re_D$ clony		256915,7893	[-]
A		0,124500256	
Ra		0,02	
Ra/D (tabulková hodnota)		0,366972477	
rychlost v potrubí	$v$	17,10	[m/s]
Podíl vzdálenosti odběrného místa před a D	$L_1$	0	[-]
Podíl vzdálenosti odběrného místa za a D	$L_2$	0	[-]
Odběrová vzdálenost od clony - před	$l_1$	0	[m]
Odběrová vzdálenost od clony - za	$l_2$	0	[m]
Plynová konstanta	$r$	287,1	[-]
Teplota	$T$	273,15	[K]
izoentropický exponent kapa	$\kappa$	1,41	[-]

### 3.13 Výpočet clony třetí iterace

Pro výpočet clony budou do téže výpočtové tabulky vloženy nové hodnoty vycházející z druhé iterace  $\beta_2$  a znovu bude vypočítána v krocích nová hodnota.

#### 3.13.1 Krok 1 - výpočet Reynoldsova čísla

Výpočet Reynoldsova čísla ze vztahu (2.4) v třetí iteraci se nemění. Kinematická viskozita  $\nu$  při teplotě  $T = 300 [K]$  je  $15,68 \cdot 10^{-6} [m^2 \cdot s^{-1}]$  a rychlost  $v = 17,1 [m \cdot s^{-1}]$ .

$$Re_D = \frac{v \cdot D}{\nu} [-] \quad (\text{viz vztah 2.4})$$

$$Re_D = \frac{15,68 \cdot 10^{-6} \cdot 54,5}{17,1} = 59435,59 [-]$$

#### 3.13.2 Krok 2 – výpočet hustoty vzduchu

Hustota vzduchu v třetí iteraci bude, ze stejného statického tlaku  $p = 10^6 [Pa]$ , z plynové konstanty  $r = 287,1 [-]$  a provozní teploty  $T = 300 [K]$ , stejná.

$$p \cdot v = r \cdot T \rightarrow p \cdot \frac{1}{\rho} = r \cdot T \rightarrow \rho = \frac{p}{r \cdot T} [kg \cdot m^{-3}] \quad (\text{viz vztah 3.8})$$

$$\rho_1 = \frac{10^6}{287,1 \cdot 300} = 11,61 [kg \cdot m^{-3}]$$

#### 3.13.3 Krok 3 – výpočet součinitele průtoku

Dosazen poměr průměrů  $\beta_2 = 0,231343$  kde průměr clony byl vypočítán  $d_1 = 12,608 [mm]$ . Dosazeno do rovnice součinitele průtoku  $C$  (3.11), hodnota  $A = \left(\frac{19000 \cdot \beta}{Re_D}\right)^{0,8} = 0,1245 [-]$ .

$$C_2 = 0,5961 + 0,0261 \cdot \beta_2^2 - 0,216 \cdot \beta_2^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \cdot \beta_2}{Re_D}\right)^{0,7} + (0,0188 + 0,006 \cdot A \cdot \beta_2^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0,3} + (0,043 + 0,080 \cdot e^{-10L_1} - 0,123 \cdot e^{-7L_1}) \cdot (1 - 0,11 \cdot A) \frac{\beta_2^4}{1 - \beta_2^4} - 0,031 \cdot (M_2 - 0,8 \cdot M_2^{1,1}) \cdot \beta_2^{1,3} + 0,011(0,75 - \beta_2) \cdot \left(2,8 - \frac{D}{25,4}\right) [-] \quad (\text{viz vztah 3.17})$$

$$C_2 = 0,5961 + 0,0261 \cdot 0,239947^2 - 0,216 \cdot 0,239947^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \cdot 0,239947}{59435,586}\right)^{0,7} + (0,0188 + 0,006 \cdot 0,1245 \cdot 0,239947^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{59435,586}\right)^{0,3} + (0,043 + 0,080 \cdot e^{-10L_1} - 0,123 \cdot e^{-7L_1}) \cdot (1 - 0,11 \cdot 0,2669) \frac{0,2319947^4}{1 - 0,239947^4} - 0,031 \cdot (0 - 0,8 \cdot 0^{1,1}) \cdot 0,239947^{1,3} + 0,011(0,75 - 0,239947) \cdot \left(2,8 - \frac{54,5}{25,4}\right) = 0,612226 [-] \text{ b}$$



### 3.13.4 Krok 4 – výpočet průměru clony

Do rovnice (3.11) dosazeno příslušné  $C = 0,0615476 [-]$ ;  $q_m = 0,012541667 [kg \cdot s^{-1}]$ ;  $\varepsilon = 1 [-]$ ;  $\Delta p = 1000 [Pa]$ ;  $\rho_1 = 11,60455416 [kg \cdot m^{-3}]$ .

$$d_3 = \sqrt{\frac{q_m}{\left(\frac{C_2}{(\sqrt{1-\beta_2^4})} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1}\right)}} [m] \quad (\text{viz vztah 3.7})$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{0,012541667}{\left(\frac{0,615476}{(\sqrt{1-0,239947^4})} \cdot 1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot 2000 \cdot 11,60455416}\right)}} = 0,013077112 [m]$$

### 3.13.5 Krok 5 - výpočet nového poměru průměrů

Výpočet nového poměru průměru, který už dále dosazován nebude.

$$\beta_3 = \frac{d_3}{D} [-] \quad (\text{viz vztah 3.13})$$

$$\beta_3 = \frac{0,01307711}{0,0545} = 0,239947 [-]$$

Tabulka 3-6 Výpočtová tabulka třetí iterace[v.t.]

Výpočet centrické clony			
		hodnoty	jednotky
hmotnostní průtok - max. kompresoru 45,15 kg/h	$q_m$	0,012541667	[kg/s]
součinitel průtoku	$C$	0,61222598	[-]
poměr průměrů	$\beta_2$	0,239943456	[-]
vnitřní průměr potrubí	$D$	0,0545	[m]
průměr otvoru clony	$d_2$	0,013077	[m]
objemový průtok	$q_v$	0,001080754	[l/s]
diferenční tlak	$\Delta p$	1000	[Pa]
koef. tep. roztažnosti	$\alpha$	1	[1/K]
pracovní teplota	$t_{\text{prac}}$	27	[°C]
hustota vz. při pracovní teplotě $t_{\text{prac}}$	$\rho_1$	11,60455416	[kg/m <sup>3</sup> ]
součinitel expanze (zaoukrouhleno)	$\varepsilon$	1	[-]
kinemat. Viskozita při 300 K (15,68.10 <sup>-6</sup> )	$\nu$	0,00001568	[m <sup>2</sup> /s]
Reynoldsovo číslo vzhledem k D	$Re_D$	59435,58673	[-]
$Re_d$ clony		247706,6382	[-]
A		0,128189592	
Ra		0,02	
Ra/D (tabulková hodnota)		0,366972477	
rychlost v potrubí	$v$	17,10	[m/s]
Podíl vzdálenosti odběrného místa před a D	$L_1$	0	[-]
Podíl vzdálenosti odběrného místa za a D	$L_2$	0	[-]
Odběrová vzdálenost od clony - před	$l_1$	0	[m]
Odběrová vzdálenost od clony - za	$l_2$	0	[m]
Plynová konstanta	$r$	287,1	[-]
Teplota	$T$	273,15	[K]
izoentropický exponent kapa	$\kappa$	1,41	[-]

### 3.14 Soupis konstrukčních hodnot centrické clony

V tabulce hodnot jsou uvedeny spočtené či zvolené hodnoty, potřebné pro konstrukci clonového kotouče a odběrných míst tlakové difference, před a za clonou. Hodnoty v tabulce vychází z obrázku 3-1 a 3-2 (str. 27-28), nebo podmínek. Dále je vytvořena tabulka, kde jsou shrnuty údaje o konstrukci měřicího prvku.

*Tabulka 3-7 Tabulka hodnot centrické clony [v.t.]*

Rozměr	Hodnota	Jednotky
$a$	1	[mm]
$b$	54,5	[mm]
$c, c'$	27,2	[mm]
$d$	13,077	[mm]
$D$	54,5	[mm]
$E$	3	[mm]
$e$	1	[mm]
$f$	3,5	[mm]
$g$	9	[mm]
$G$	0,05	[mm]
$h$	5	[mm]
$j$	4	[mm]
$A R_a$	0,001	[mm]
$\alpha$	45	[°]

Tabulka 3-8 Sumarizační tabulka [v.t.]

<b>SUMARIZAČNÍ TABULKA</b>	
Typ měřidla	Centrická clona s komorovým odběrem
Materiál měřidla	ČSN 10088-1 1.4301 (AISI 304)
Materiál potrubí	ČSN EN 1092-1 – 11 343.0
Příruba ; Materiál příruby	Polotovar ČSN 13 1160-1,2; ČSN EN 1092-1 – 11 343.0 [14]
Metoda konstrukce spoje	VST – Vedlejší silový tok
Těsnění	Temafast -ČSN 02 9310 TK 80x90 tl.:2,5 [mm] [16]
Měřená tekutina	Vzduch -hustota 11,604 [kg/ m <sup>3</sup> ] při dané teplotě a tlaku
Objemový průtok	35 [m <sup>3</sup> /h]
Provozní tlak	1 [MPa]
Provozní teplota	27 [°C]
DN potrubí	50 [-]
PN potrubí	16 [-]
Přesný rozměr potrubí	D <sub>vnitř</sub> -54,5 [mm]; D <sub>venk</sub> 60,3 [mm]; Tl.-2,9 [mm]
Poloha potrubí měřicího úseku	horizontální
Těsnící plochy	V přírubách i v odběrových prstencích jsou nákrůžky pro sousost a vložení těsnění
Diferenční tlak	1000 [Pa]
Vývody tlakové difference (trubka)	D <sub>vnitř</sub> - 6 [mm]; D <sub>venk</sub> - 4 [mm]; Tl.- 2 [mm]; mat.:11 373. Navařeny
Vnitřní průměr clony	d = 13,077 [mm]
Poměr průměrů $\beta$	0,239947 [-]

### 3.15 Požadavky na zabudování

Primární prvek musí být umístěn mezi přírubové spoje a dvěma částmi přímého válcovitého potrubí konstantního průměru a specifikovaných minimálních délek, v nichž nejsou žádné jiné překážky nebo odbočení, které by způsobily změnu proudění. V případě odboček musí být splněna norma 5167-1. Ve výpočtech jsou stanoveny a uvažovány vzdálenosti, které nevyžadují žádné ustalovače a usměrňovače proudění. Vnitřek potrubí bude uvažován jako kruhový a bezešvý. Povrchové úpravy vnitřku potrubí a na centrické cloně budou provedeny dle výpočtu a budou vyznačeny ve výkresu clony. Požadavky a parametry zabudování, jsou uvedeny, viz (Tabulka 3-8). Těsnění [16] je zvoleno dle druhu média a konstrukce spoje VST. Tento způsob je náročnější na výrobu, a také zvyšuje hmotnost spoje, ale nemá vliv na těsnost při vnějším namáhání a nemění se velikost těsnících ploch, viz (Obrázek 3-4). Pro snadnější montáž a údržbu je soustava prvků centrické clony spojena dvěma plechy.

## Současný náhled na dimenzování přírubových spojů 3/4



•Konstrukce spoje HST vs. VST:

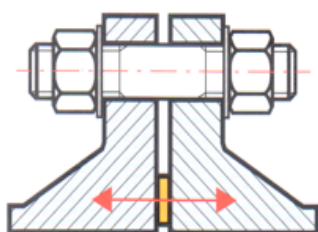
### •Hlavní silový tok (HST)

#### •Výhody:

- Normalizované příruby
- Lepší těsnicí vlastnosti s větším předepnutím při montáži

#### •Nevýhody

- Velká změna tlaku na těsnění vlivem vnějšího zatížení



[42] hlavní silový tok HST

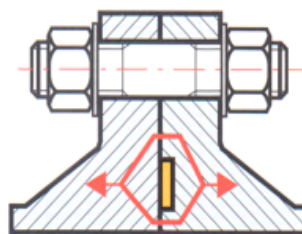
### •Vedlejší silový tok (VST)

#### •Výhody:

- Vnější namáhání nemá vliv na těsnost
- Nemění se velikost těsnicích ploch v provozu vlivem, např. teplotní dilatace

#### •Nevýhody

- Větší hmotnost



[42] vedlejší silový tok VST

Obrázek 3-4 Dimenzování přírubových spojů [3]

## 4. Závěr

V bakalářské práci jsem se zabýval konstrukcí centrické clony pro měření průtoku vzduchu na výtlaku šroubového kompresoru, výrobce firma Atmos s.r.o., který je i součástí laboratoře na VŠB TUO Fakulty strojní.

V teoretické části jsem zmínil historii měření průtoku tekutin a důvody tohoto měření. Byly vybrány nejpoužívanější měřicí prvky pro tlakovou diferenci, které se používají v nejrůznějších provozech.

V praktické části jsem vybral měřicí prvek dle zadání a definoval jsem pomocí norem podmínky, za jakých může být prvek zkonstruován. Měl jsem na výběr tři způsoby konstrukce clony a odběrových míst, které bych označil, jako různě obtížné a náročné. Kdybych měl označit tuto obtížnost číslem 1 až 3, tak způsob konstrukce měřidla je v obtížnost 2. Provedl jsem výpočty a vytvořil jsem výpočtovou tabulku tak, aby tyto výpočty splňovali podmínky normy ČSN EN ISO 5167-1 a 2 [10] a [11]. Dále jsem provedl výpočty v krocích, počínaje Reynoldsovým číslem, vztaženému k vnitřnímu průměru potrubí, hustotě vzduchu, dané teploty a tlaku. Pro první iteraci jsem zvolil poměr průměrů a do dalších iterací jsem tento údaj už zadával spočtený. Výsledný průměr clony a následný poměr, jsem již dosazoval do další iterace, která zpřesňovala výsledný průměr clony. Výsledný průměr musel splňovat konstrukční podmínky dané normou ČSN EN ISO 5167-2 [11], kdy průměr otvoru clony musí být větší než 12,5 mm. Snažil jsem se postupovat co nejjednodušším způsobem tak, aby konstrukce byla levná, ale proveditelná v praxi. Vytvořením výpočtové tabulky, jsem si práci s výpočty zjednodušil.

## Poděkování

Především děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Šmídovi, Ph.D., za veškeré rady, a především obrovskou trpělivost, kterou měl, při mých konzultacích. Chtěl bych poděkovat také své rodině a kamarádům za podporu v průběhu studia.

V Ostravě 10. 5. 2020



podpis studenta

## 5. Seznam použité literatury

- [1] VUT BRNO – *Měření průtoku tekutin - principy průtokoměrů* [online]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html>
- [2] WIKIPEDIE – *Historická metrologie* [online]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Historick%C3%A1\\_metrologie](https://cs.wikipedia.org/wiki/Historick%C3%A1_metrologie)
- [3] MATTECH [online]. Copyright © 2016 MATTECH. Všechna práva vyhrazena. Webmaker [cit. 01.03.2019]. Dostupné z: <http://mattech.cz/>
- [4] ELEKTROREVUE [online]. Dostupné z: [http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html#\\_Zp%C5%AFsoby\\_m%C4%9B%C5%99en%C3%AD\\_pr%C5%AFtoku](http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html#_Zp%C5%AFsoby_m%C4%9B%C5%99en%C3%AD_pr%C5%AFtoku)
- [5] THE HISTORICAL DEVELOPMENT OF FLOW METERING - *Measurement - Control*, Flowmeasurement Special Issue, June 1986 str 11-22
- [6] Z HISTORIE MĚŘENÍ | 3 pól - Magazín plný pozitivní energie. Úvod | 3 pól - *Magazín plný pozitivní energie* [online]. Copyright © Třípól [cit. 02.04.2020]. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/fyzika-a-klasicka-energetika/1964-z-historie-mereni>
- [7] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. Úvaly: Albra, 2003. ISBN isbn80-8649 0-74-2. 985 s.
- [8] *Katedra hydrauliky a hydrologie - K141* [online]. Copyright © [cit. 02.05.2020]. Dostupné z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke\\_st\\_zeni/prednasky/HY2V\\_04\\_Hydraulika\\_potrubí.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_st_zeni/prednasky/HY2V_04_Hydraulika_potrubí.pdf)
- [9] PORTÁL PRO STROJNÍ KONSTRUKTÉRY - *Dynamická a kinematická viskozita vzduchu* [online]. Copyright © 2013 [cit. 29.03.2020]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/dynamicka-a-kinematicka-viskozita-vzduchu>
- [10] ISO 5167-1. *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu. Část 1 Obecné principy a požadavky*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2003, 36 s. Třídící znak 25 7710
- [11] ISO 5167-2. *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu. Část 2: Clony a požadavky*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2003, 52 s. Třídící znak 25 7710

- [12] WIKIPEDIE – *Měření průtoku kapalin*. [online]. Dostupné z: <[https://cs.wikipedia.org/wiki/M%C4%9B%C5%99en%C3%AD\\_pr%C5%AFtoku\\_kapalin](https://cs.wikipedia.org/wiki/M%C4%9B%C5%99en%C3%AD_pr%C5%AFtoku_kapalin)>
- [13] MERATEX. *Měřicí přístroje*. Pitotova trubice typu L s termočlánkem typu K - [online]. Dostupné z: <<http://www.meratex.cz/pitotova-trubice-typu-L-s-tck>>
- [14] 5.1. MĚŘENÍ AEROMETRICKÝCH VELIČIN *Aerodynamika vysokých rychlostí VŠB*. [online]. Dostupné z: <<https://aerodynamika-vysokych-rychlosti-vsb.webnode.cz/ziskavani-aerometrickych-dat-pri-nadzvukovych-rychlostech/mereni-aerometrickych-velicin-pri-nadzvukovych-rychlostech/>>
- [15] WIKIPEDIE – *Římské akvadukty* [online]. Dostupné z: <[https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%98%C3%ADmsk%C3%A9\\_akvadukty](https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%98%C3%ADmsk%C3%A9_akvadukty)>
- [16] POKORNÝ SPOL. S R.O. POWER(R)torque - *Omezení emisí z přírubových spojů*. © 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <<http://www.tesneni.cz/cs/sluzby/fm>>
- [17] KLEIO. *Míry a váhy*. [online]. Copyright © 2011. All Rights Reserved. [cit. 04.05.2020]. Dostupné z: <<https://www.kleio.cz/web/index.php/apendixnav/mirynav>>
- [18] ĎAŘO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. *Měření průtoku a výšky hladiny*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN isbn:80-7300-156 s.(váz.).
- [19] BERNOULLIHO ROVNICE. *MEF. Fyzika : MEF* [online]. Copyright © 2006 [cit. 10.04.2020]. Dostupné z: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/125-bernoulliho-rovnice>>



## **6. Seznam příloh**

**Příloha A** – Centrická clona - sestava [Vlastní zpracování]

**Příloha B** – Centrická clona - kusovník [Vlastní zpracování]

**Příloha C** – Výpočtová excelová tabulka, viz soubor ZIP [Vlastní zpracování]

**Příloha D** – Centrická clona - výkres [Vlastní zpracování]

**Příloha E** – Technický list kompresoru [Výrobce]